

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

STUDY OF LASER BEAM POLISHING OF QUARTZ GLASS

E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, A.E. Shershnev

F. Scorina Gomel State University

Представлены результаты исследования процесса лазерной полировки кварцевого стекла, полученные с использованием конечно-элементного моделирования. Также представлены результаты экспериментов по лазерной полировке кварцевого стекла с использованием CO_2 -лазера.

Ключевые слова: лазер, кварцевое стекло, полировка, моделирование.

This paper presents the results of a study of the laser polishing quartz glass obtained by using finite element modeling. In addition, the results of experiments on the laser polishing quartz glass by using CO_2 -laser.

Keywords: laser, quartz glass, polishing, simulation.

Введение

Кварцевое стекло обладает высокой термостойкостью и высокой механической прочностью, устойчиво к действию кислот и воды. Благодаря этим свойствам кварцевое стекло применяется в качестве материала для изготовления окон фотоприемников и колб газоразрядных ламп, из него производятся линзы для передачи ультрафиолетового излучения и призмы для монохроматоров и спектрофотометров [1].

Применение излучения CO_2 -лазера в качестве технологического инструмента для обработки кварцевого стекла эффективно при лазерной резке и сварке, лазерной очистке кварцевого сырья и вытяжке волоконных световодов [2]–[11].

Так же известны примеры реализации лазерной полировки кварцевых стекол с использованием излучения CO_2 -лазера [11]–[14]. В работах [13], [14] отмечена высокая скорость лазерной полировки, а так же возможность обработки поверхностей различной формы. В работе [11] обращается внимание на возможность автоматизации процесса полировки лазерным излучением изделий из кварцевого стекла и отсутствие загрязнений нагреваемого объекта источниками нагрева.

Однако, лазерной полировке присущ ряд недостатков, затрудняющих ее дальнейшее широкое промышленное распространение [13], [14] и обуславливающих необходимость проведения исследований лазерной полировки кварцевого стекла с использованием излучения CO_2 -лазера.

1 Моделирование

Моделирование процесса лазерного нагрева кварцевого стекла было выполнено методом конечных элементов [15] в соответствии со схемой,

представленной на рисунке 1.1. Цифрой 1 отмечен лазерный пучок, цифрой 2 – кварцевое стекло. На рисунке прямыми линиями со стрелками указаны направления перемещения лазерного пучка относительно обрабатываемого изделия.

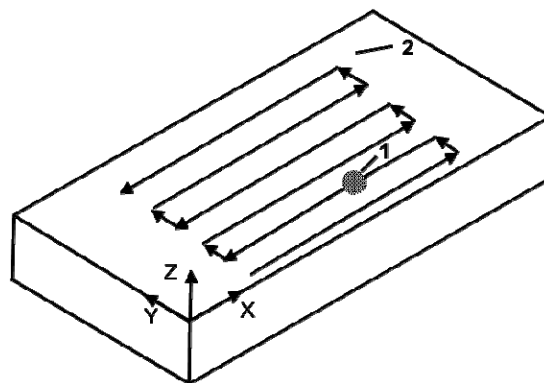


Рисунок 1.1 – Схема перемещения лазерного пучка в зоне обработки:

1 – пятно лазерного пучка;
2 – кварцевая пластина

Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры (рисунок 1.2) [13].

Расчеты были выполнены для образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм, с использованием следующих значений технологических параметров обработки: плотность мощности лазерного излучения $P_0 = 22 \cdot 10^6$ Вт/м², радиус поперечного сечения лазерного пучка $R = 1,5$ мм. Модуль скорости относительного перемещения лазерного пучка и образца $V = 2,5$ мм/с.

На рисунке 1.3 представлено разбиение кварцевой пластины на конечные элементы.

Символами Т1–Т9 отмечено расположение контрольных точек.

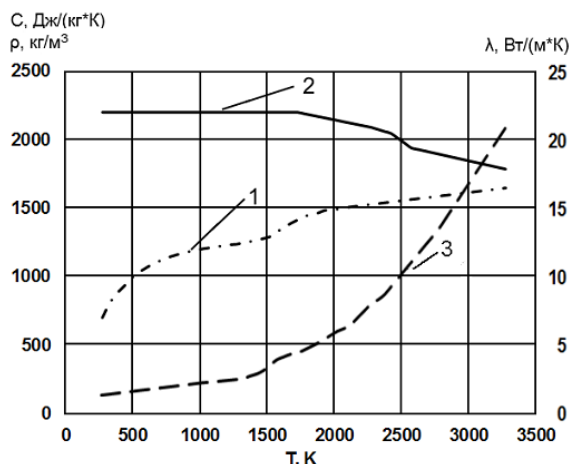


Рисунок 1.2 – Зависимость теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры:

1 – теплоемкость C , Дж/(кг·К);
2 – плотность ρ , кг/м³;
3 – теплопроводность λ , Вт/(м·К)
(графики 1 и 2 относятся к левой шкале ординат, график 3 к правой оси ординат)

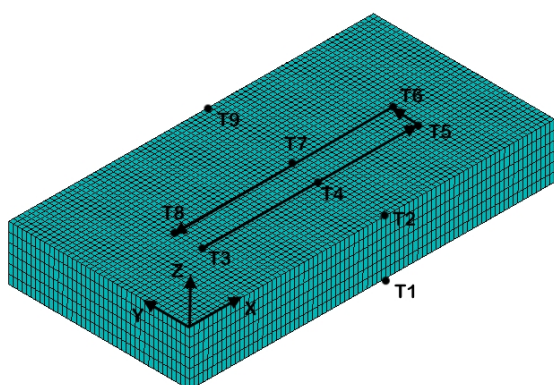


Рисунок 1.3 – Конечно-элементное разбиение расчетной области

Результаты проведенных расчетов приведены на рисунках 1.4, 1.5. На рисунке 1.4 представлены расчетные зависимости температуры в контрольных точках от времени.

Анализируя данные, приведенные на рисунке 1.4 а), видим, что температура в контрольных точках Т3–Т5 в результате многократного лазерного нагрева кварцевой пластинки по схеме, приведенной на рисунке 1.1, периодически резко повышается. При этом вначале в контрольных точках наблюдается плавное увеличение максимальных значений температуры, которое после прохождения центром лазерного пучка этих точек сменяется их снижением. Значения температуры в контрольных точках Т1–Т2, Т9, расположенных вне контура обработки так же периодически изменяются и сопровождаются ростом максимальных значений, обусловленных прогревом

лазерным излучением обрабатываемой пластины (рисунок 1.4, б). Нужно отметить, что, при выбранной схеме и параметрах лазерной полировки, участки обрабатываемой поверхности неоднократно достигают температуры размягчения кварцевого стекла, которая находится в диапазоне 1773–1943 К [5].

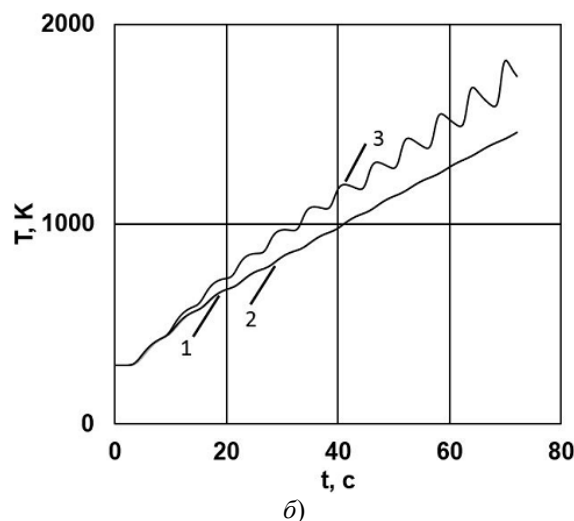
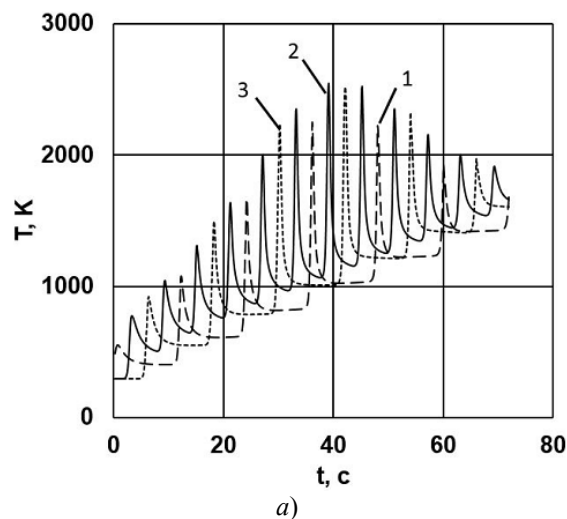


Рисунок 1.4 – Расчетные значения температуры
а) в контрольных точках Т3 (линия 1), Т4 (линия 2), Т5 (линия 3);
б) в контрольных точках Т1 (линия 1), Т2 (линия 2), Т9 (линия 3)

На рисунке 1.5 показаны расчетные распределения температурных полей на поверхности кварцевой пластины в моменты времени, соответствующие прохождению центра лазерного пучка через контрольные точки Т3–Т8.

Как видно из данных, представленных на рисунке 1.5, локализация изотер, соответствующих температуре размягчения, имеет круглую форму и практически не изменяется с течением времени.

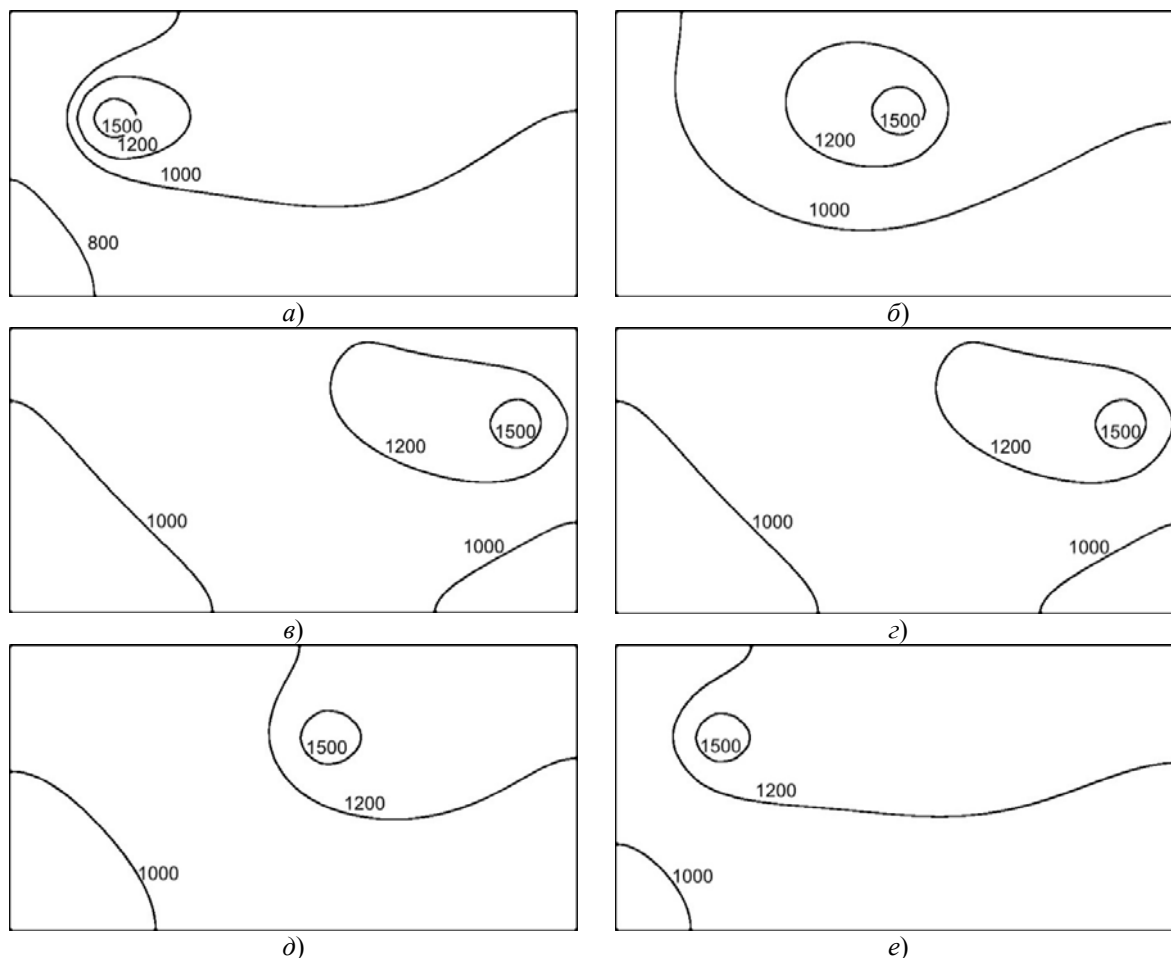


Рисунок 1.5 – Расчетное распределение температуры на поверхности кварцевого стекла:
а) $t = 36$ с; б) $t = 39$ с; в) $t = 42$ с; г) $t = 42,1$ с; д) $t = 45$ с; е) $t = 48$ с

При этом изотермы, соответствующие более низким температурам в ходе обработки, постоянно изменяются. Стабильность формы зоны размягчения при выбранной схеме и технологических параметрах на практике обеспечивает однородность качества обработанной поверхности при реализации процесса лазерной полировки кварцевого стекла.

2 Эксперимент

Экспериментальные исследования процесса лазерной полировки кварцевых стекол были выполнены на установке для лазерной обработки материалов. На рисунке 2.1 представлена схема установки.

В качестве образцов использовались кварцевые пластины различного типоразмера. Полировка осуществлялась лазерным пучком, который сканировал поверхность пластины по схеме, представленной на рисунке 1.1. Скорость обработки варьировалась от 1,25 мм/с до 5 мм/с. Шаг смещения лазерного пучка после одного прохода в направлении оси Y составлял 0,25 мм.

Качество обработки поверхности кварцевого стекла оценивалось по параметрам шероховатости

R_a и R_z . Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунках 2.2–2.3 и в таблице 2.1.

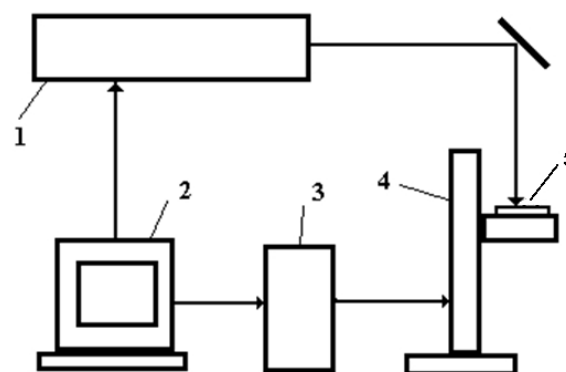


Рисунок 2.1 – Схема лазерной установки:

1 – CO₂-лазер, 2 – компьютер,
3 – блок управления, 4 – координатный стол,
5 – кварцевая пластина

Как видно из данных, приведенных в таблице 2.1 и на рисунке 2.2, в результате лазерной полировки поверхности кварцевого стекла параметр R_a уменьшался в 5–8 раз, а параметр R_z – в 8–12 раз.

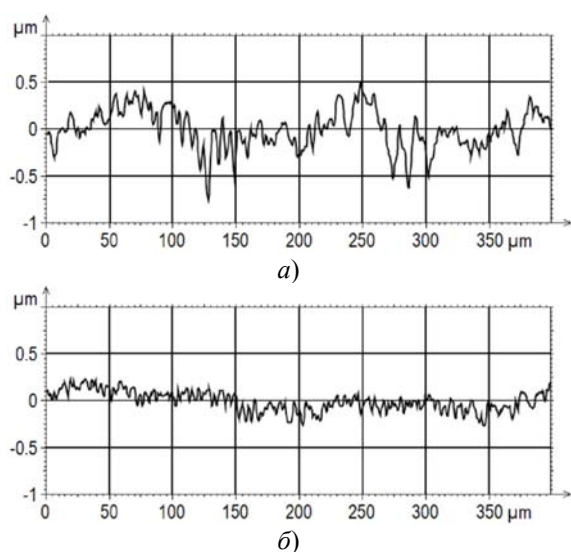


Рисунок 2.2 – Профилограмма пластинки из кварцевого стекла

а) до лазерной полировки;
б) после лазерной полировки

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента по полировке кварцевого стекла

V_z , мм/с	До полировки		После полировки	
	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм
1,25	4,58	0,333	0,49	0,0645
2,5	2,71	0,278	0,220	0,0374
5	4,07	0,547	0,460	0,0812

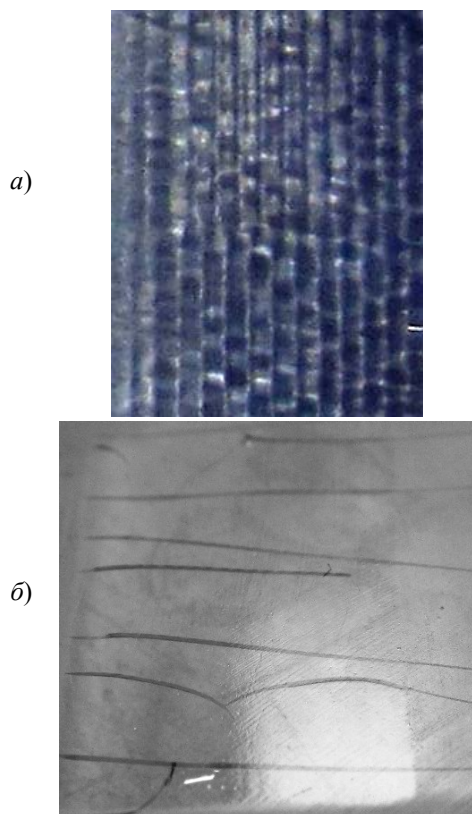


Рисунок 2.3 – Дефекты, возникающие при полировке кварцевого стекла:

а) появление борозд; б) появление трещин

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что при параметрах обработки, приводящих к перегреву кварцевой пластины, наблюдается формирование борозд на обрабатываемой поверхности (рисунок 2.3, а). Кроме этого, в ряде случаев происходит растрескивание образцов (рисунок 2.3, б), обусловленное наличием остаточных напряжений.

Выводы

В работе определены особенности пространственной локализации температурных полей при полировке кварцевого стекла излучением CO_2 -лазера. Установлена необходимость проведения дополнительного моделирования процесса лазерной полировки кварцевого стекла с анализом полей термоупругих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
3. Шершнев, Е.Б. Разработка и внедрение новых эффективных процессов в производство стеклоизделий с применением лазерной технологии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Е.Б. Шершнев. – М, 1990. – 145 с.
4. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 5147 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 03В 33/00 / Е.Б. Шершнев, С.И. Соколов, А.С. Побыха; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф.Скорины – № и 20080615; заявл. 30.07.08; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 88.
5. Борисовский, В.Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла: дис. докт. техн. наук: 05.11.14 / В.Е. Борисовский; МГУПИ. – М., 2011. – 182 с.
6. Шершнев, Е.Б. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке аморфного кварца / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 105–109.
7. Шершнев, Е.Б. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3 (16). – С. 39–44.
8. Шершнев, Е.Б. Моделирование двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, Г.А. Баевич // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 216–220.
9. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 9675 Респ. Беларусь, МПК (2006)

С 03В 1/00 / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № и 20130334; заявл. 15.04.13; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5. – С. 196.

10. Установка для двухлучевой лазерной сварки кварцевого стекла: пат. 9962 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 03В 33/02 Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № и 20130623; заявл. 25.07.13; опубл. 28.02.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 171.

11. Многопрофильная лазерная технология обработки кварцевого стекла / В.К. Сысоев // Электронный научный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/053.pdf>. – Дата доступа: 25.01.2009.

12. Sysoev, V.K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V.K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003. – Vol. 60. – P. 106–107.

13. Hildebrand, J. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // Physics Procedia. – 2011. – № 12. – P. 452–461.

14. Hildebrand, J. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // Physics Procedia. – 2012. – № 39. – P. 277–285.

15. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.

Поступила в редакцию 11.09.15.